

跳水内部の空気混入特性

日大院理工学研究科 学生会員 ○菅谷 一平
 日本大学理工学部 正 会 員 高橋 正行
 日本大学理工学部 フェロー 大津 岩夫

1. はじめに

ゲート下流側に形成される跳水は、一般に跳水中には空気を取り込まれ、多量の気泡が混入した流れ(white water)となっている。跳水への空気混入メカニズムや跳水内部の空気混入特性については不明な点が多く、この解明が必要である。

スルースゲート下流側に形成される跳水への流入射流は乱流境界層の発達状態(図-1 参照)によって Undeveloped inflow (以下 UD と略す), Partially developed inflow (PD と略す), および Fully developed inflow (FD と略す) に分けられる。

従来の研究において Resch and Leutheusser¹⁾は UD と FD によって跳水内部の空気混入率 C 【= 空気の体積/(空気の体積+水の体積)】および流速特性に違いのあることを示した。しかし、この理由は不明であり、さらに実験値は熱線流速計で得られているため、空気混入率の測定としてはその精度に問題がある。Chanson and Gualtieri²⁾は点電極型ボイド率計を用いて PD の流況のみを対象に空気混入特性を示しているが、FD と UD についての検討はなされていない。高橋・大津³⁾と Ohtsu et al.⁴⁾は点電極型ボイド率計を用いて、一定の跳水始端のフルード数のもとで、UD, PD, および FD によって跳水内部の空気混入率が変化することを示している。しかしながら、この理由については、さらなる解明が必要である。また、広範囲のフルード数に対して、乱流境界層の発達状態(UD, PD, および FD)が跳水内部の空気混入特性に与える影響や跳水中へ空気を取り込む機構については不明である。

この研究では、跳水始端の乱流境界層の発達状態(UD, PD, および FD)が跳水内部の空気混入特性におよぼす影響について、広範囲なフルード数に対して実験的に検討し、跳水内部への空気混入メカニズムについて明らかにしようとしたものである。

2. 実験方法

スルースゲートを有する水路幅 B の長方形断面水平

水路を用いて、定常跳水が形成される跳水始端のフルード数 $Fr_1 [= V_1/(gh_1)^{1/2}]$ とレイノルズ数 $Re [= V_1 h_1 / \nu]$ を対象に、表-1に示す条件のもとで実験を行った。ここに、 g は重力加速度、 h_1 は跳水始端水深、 x は縮流部を原点とする水路流下方向の座標軸、 $x = x_1$ は跳水始端断面の座標、 $x = x_{cp}$ は境界層厚 δ が水面に達して $\delta = h$ となる限界点の座標、 y は水路床を原点とする鉛直上向きの座標軸、 V_1 は跳水始端断面の断面平均流速、 ν は水の動粘性係数である。なお、 $Re > 6.0 \times 10^4$ のとき自由跳水の流況に対する Re の影響がない⁵⁾ ことから $Re = 6.2 \times 10^4$ を対象とした。FD の場合の跳水始端は $x_1 = 2x_{cp}$ 、UD の場合は $x_1 = 0$ 、PD の場合は $\delta/h_1 = 0.5$, 0.8 となる x_1 とした。射流の乱流境界層厚 δ と水深 h は Ohtsu and Yasuda の方法⁶⁾ を用いて計算し、表-1の条件が得られるように流量、スルースゲートの開口高、水路下流端の堰高を調整した。

跳水内部の空気混入率 C の測定には2点電極型ボイド率計(プローブ直径 $25\mu\text{m}$, 採取間隔 $50\mu\text{s}$, 採取時間 20s)を使用した。

表-1 実験条件

Inflow Condition	Fr_1 [-]	$Re \times 10^{-4}$ [-]	B [m]	δ/h_1 [-]
UD	4.2	6.2	0.4	0
	5.2			
	6.2			
	7.2			
	8.2			
PD	5.2	6.2	0.4	0.5 0.8
	6.2			
	7.2			
	8.2			
	8.2			
FD	4.6	6.2	0.4	1
	5.2			
	6.2			
	7.2			
	8.2			

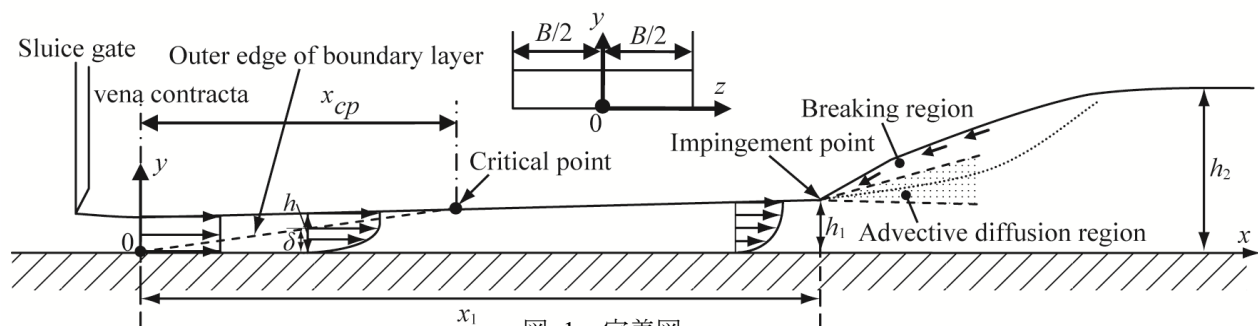


図-1 定義図

キーワード 空気混入率, 跳水, 乱流境界層, 気液混層流, スルースゲート

連絡先 〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14 日本大学理工学部 TEL. & FAX. 03-3259-0676

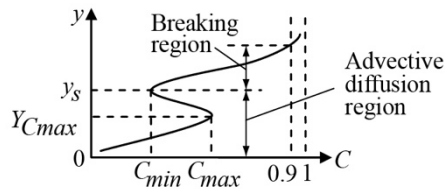


図-2 空気混入率分布概念図

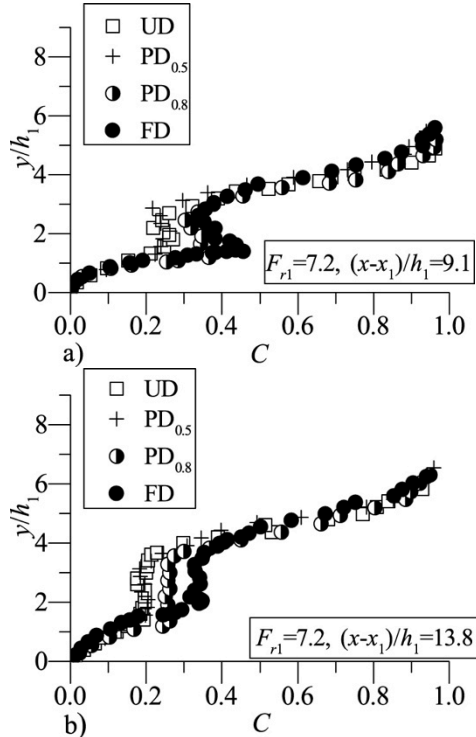


図-3 UD,PD,FD による空気混入率分布の変化

3. 跳水内部の空気混入率分布

アスペクト比 $B/h_1 \geq 10$ の場合の水路中央面($z=0$)での跳水内部の空気混入率 C は次の関係で示される⁷⁾.

$$C = f\left(\frac{y}{h_1}, \frac{x-x_1}{h_1}, \frac{\delta}{h_1}, F_{r1}\right) \quad (1)$$

流入射流の水面と跳水の表面渦先端との交点である impingement point(図-1)近くで取り込まれた気泡は跳水中で移流・拡散する. そのため, 跳水内部の空気混入率 C の値は y の増加に伴い大きくなり, 空気混入率の極大値 C_{max} を経て C の値は $y=y_s$ まで減少し, $y=y_s$ で極小値 C_{min} をとる (図-2). 図-2 のように C_{max} , C_{min} が存在する $y \leq y_s$ の領域を Chanson⁸⁾ は advective diffusion region と呼んでいる. 一方, $y > y_s$ の領域では, 跳水の表面渦の水面の breaking により空気を取り込まれるため, y の増加に伴い C の値は 1 に近づく. この領域を breaking region と呼ぶことにする⁷⁾ (図-2).

(1) 跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の乱流境界層の発達状態の影響

(a) Advective diffusion region 内の空気混入特性に対する乱流境界層の発達状態の影響

与えられた F_{r1} および跳水始端からの距離 $(x-x_1)/h_1$ に対して UD, PD [$\delta/h_1=0.5$ の PD (PD_{0.5} と略す), $\delta/h_1=0.8$ の PD (PD_{0.8} と略す)], FD による, C 分布の変化

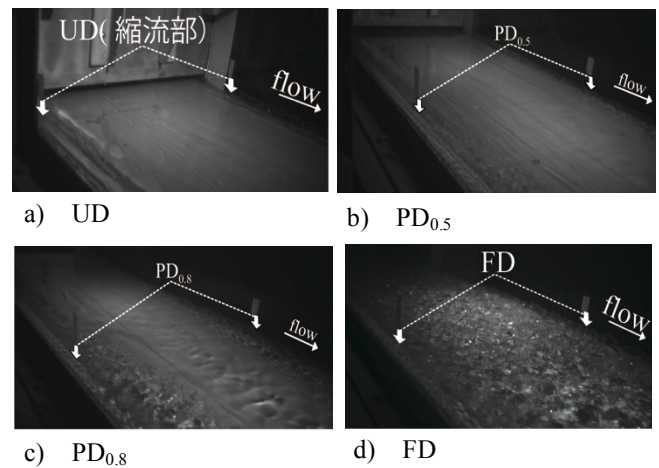
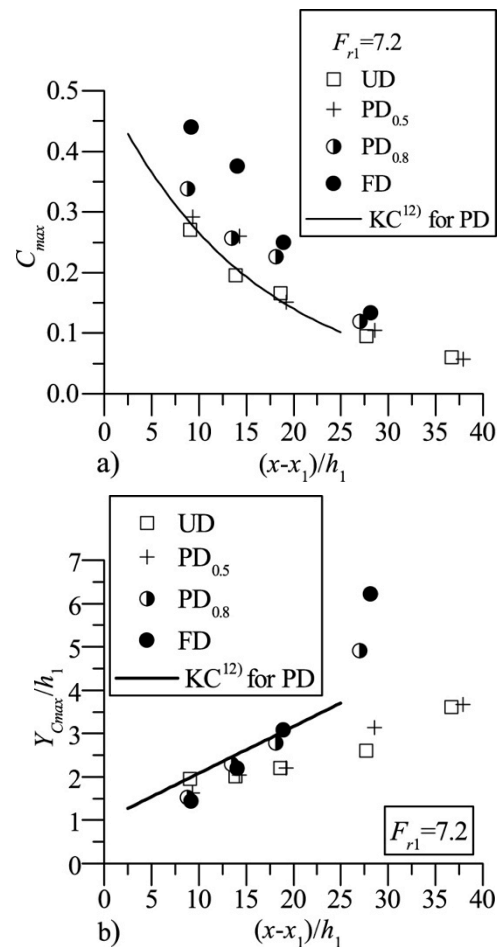
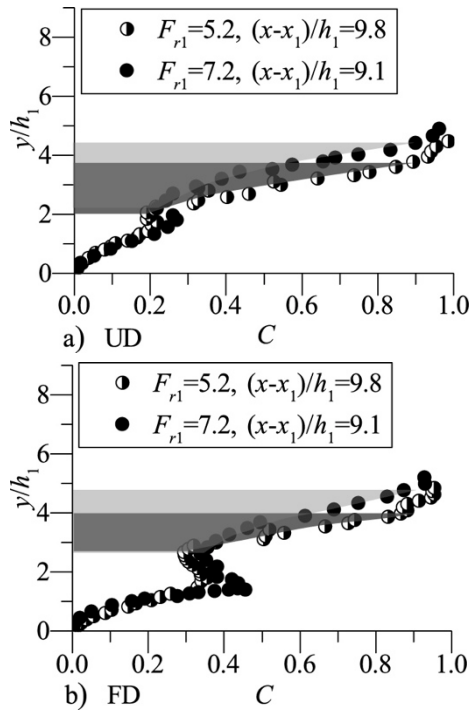


図-4 射流水面の様子

図-5 C_{max} と Y_{Cmax}/h_1 の乱流境界層の発達状態による違い(KC: Kucukali and Chanson¹²⁾)

の一例を図-3 に示す. 図-3 に示されるように, advective diffusion region 内で UD と PD_{0.5} の場合の空気混入率分布はほぼ一致している. また, FD の C の値は UD と PD_{0.5} の C の値よりも大きい. これは, FD の場合, 境界層が水面まで到達し, 水面の凹凸を伴う変動(図-4 d)を誘起し, impingement point(図-1)から取り込まれる空気量が多くなったためと考えられる. さらに, PD_{0.8} の C の値は UD と FD の中間の C の値を示す. これは, PD_{0.8} の場合, 乱れが間欠的に水面まで達し, 水面の凹凸を伴う変動が間欠的に誘起されたためと考えられる. このことは平板上の乱流境界層においては,

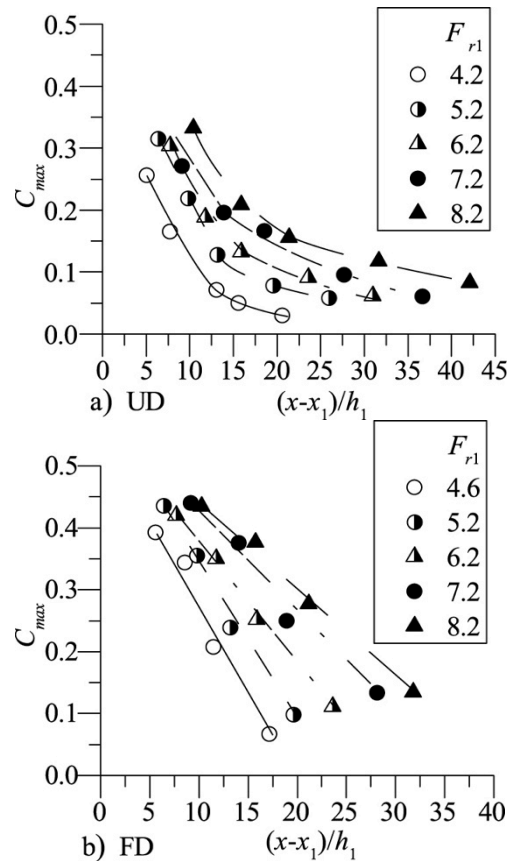
図-6 F_{r1} による空気混入率分布の変化

乱流境界層内の乱れが $y=1.2\delta$ まで間欠的に影響をおよぼす事が示されており⁹⁾, $PD_{0.8}(\delta = 0.8h_1)$ においてもこれと類似な現象が生じ, 乱流境界層の影響する高さは $1.2\delta = 1.2 \times 0.8h_1 = 0.96h_1 \approx h_1$ となるため, 水面近くまで乱流境界層の影響を受けたものと考えられる. Ervine and Falvey¹⁰⁾は pool に突入する water jet の乱れ強さが大きくなると pool に混入する空気量が增多することを示している. また, Wilhelms and Gulliver¹¹⁾は急勾配水路からの流れが水路下流側の pool に突入(plunging)するとき, 水面の凹凸の間の空気が突入点(impingement point)から気泡となり, pool 内に取り込まれることを指摘している. これと類似な現象が FD, $PD_{0.8}$ の場合にも生じ, 流入射流の水面の凹凸の間の空気が跳水内部に取り込まれ, C の値が増加したものと考えられる.

与えられた F_{r1} に対して乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)による advective diffusion region 内の空気混入率の極大値 C_{max} およびその位置 Y_{Cmax}/h_1 の流下方向変化の一例を図-5 a) に示す. 図-5 a) に示されるように, 与えられた F_{r1} に対して FD の場合の C_{max} の値は, UD, $PD_{0.5}$, および $PD_{0.8}$ の場合の C_{max} の値より大きい. また, 図-5 b) に示されるように, FD の場合の Y_{Cmax}/h_1 の値は, $(x-x_1)/h_1$ が大きくなると, PD および UD の Y_{Cmax}/h_1 の値よりも大きくなる. これは, FD と $PD_{0.8}$ の場合, 水面の凹凸を伴う変動の影響(図-4 d)を受けるため, UD と $PD_{0.5}$ よりも advective diffusion region 内に多量の空気が混入したことで, 気泡の浮力効果が大きくなり, 短区間で advective diffusion region が上昇したものと考えられる.

(b) Breaking region 内の空気混入特性に対する乱流境界層の発達状態の影響

与えられた F_{r1} および跳水始端からの距離 $(x-x_1)/h_1$ に対して, 乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)による breaking region 内の C 分布の一例を図-3 に示す. 図-3 に示されるように, UD, PD, FD に対する $y_s < y < y_{0.9}(y_{0.9}$

図-7 F_{r1} による C_{max} の変化

は $C=0.9$ となる y)の breaking region 内の C 分布は, $y=y_s$ 付近を除いてほぼ一致する. これは, breaking region 内への空気混入は表面渦の碎波によって取り込まれたものであるため, 流入射流の乱流境界層の発達状態の影響を受けないものと考えられる.

(2) 跳水内部の空気混入特性に対する流入射流のフルード数の影響

(a) Advective diffusion region 内の空気混入特性に対する F_{r1} の影響

与えられた乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)および $(x-x_1)/h_1$ に対して F_{r1} による C 分布の変化の一例を図-6 に示す. 図-6 に示されるように, advective diffusion region 内の C の値は, F_{r1} が増加すると増加する. これは, UD, PD, FD, 共に F_{r1} が増加すると表面渦の水面勾配と流入射流の流速が大きくなり, impingement point から取り込まれる空気量が大きくなったためと考えられる. さらに FD の場合は, 流入射流の水面での乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ (u' は流下方向の変動流速)が F_{r1} と共に大きくなる. この理由は; ①水面近くの無次元乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U$ の値は F_{r1} の大きさに関わらず一定値を示す⁶⁾; ②与えられた h_1 に対して, F_{r1} が大きくなると V_1 が大きくなる; ③流速分布の指数則($1/7$ 乗則)⁶⁾より $U = 8/7V_1$ であるから F_{r1} の増加と共に乱れ強さ $\sqrt{u'^2}$ は大きくなるためである. したがって, 流入射流の水面の凹凸を伴う変動も F_{r1} と共に大きくなるため impingement point から取り込まれる空気量が増加したものと考えられる.

与えられた乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)に

対して C_{max} の流下方向変化の一例を図-7 に示す. 図-7 に示されるように, 同一の $(x-x_1)/h_1$ に対して, F_{r1} の増加に伴い C_{max} の値は大きくなる. これは, F_{r1} が増加すると, 表面渦の砕波による水面近くの空気混入量が増加し, impingement point から advective diffusion region に取り込まれる空気量が大きくなったためと考えられる. さらに, F_{r1} の増加に伴い流入射流の平均流速が大きくなり, impingement point から取り込まれた気泡が遠方まで運ばれたためと考えられる.

(b) Breaking region 内の空気混入特性に対する F_{r1} の影響

与えられた乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)および $(x-x_1)/h_1$ に対して F_{r1} による breaking region 内の C 分布の変化の一例を図-6 に示す. 図-6 に示されるように, breaking region 内の空気混入量 [$F_{r1} = 5.2$ (UD, FD) のとき ■ の領域で, $F_{r1} = 7.2$ (UD, FD) のとき ■ の領域で示す.] は F_{r1} の増加に伴い増加している. これは, 与えられた h_1 に対して F_{r1} が増加すると跳水終端の水深 h_2 が増加し, これに伴い跳水の表面渦の水面勾配が大きくなり, 砕波によって breaking region に取り込まれる空気混入量が大きくなったためと考えられる.

4. まとめ

跳水内部への空気混入特性について解明した結果を以下に示す.

- ・跳水内部の空気混入率分布および空気混入機構に基づき, 空気混入領域を advective diffusion region と breaking region の 2 つに区分できる.

- ・与えられた F_{r1} および $(x-x_1)/h_1$ に対して, breaking region 内の C の大きさは, 流入射流の乱流境界層の発達状態の影響を受けない(図-3). 一方, 乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)と $(x-x_1)/h_1$ を同一にした場合, F_{r1} の増加に伴い breaking region 内の空気混入量は増加する(図-6). これは, F_{r1} の増加に伴い表面渦の水面勾配が大きくなり, 表面渦の砕波による水表面からの空気混入量が大きくなったためと考えられる.

- ・与えられた F_{r1} および $(x-x_1)/h_1$ に対して, 乱流境界層の発達状態による advective diffusion region 内の空気混入率 C は, FD の場合が最も大きく, UD と PD_{0.5} の場合が最も小さく, PD_{0.8} の場合はその中間の値を示す(図-3). これは, 乱流境界層が水面に到達することで射流水面の凹凸を伴う変動を誘起(図-4d)したことが, advective diffusion region 内の C に影響を与えたことによるものと考えられる.

- ・与えられた乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)と $(x-x_1)/h_1$ に対して, advective diffusion region 内の C は, F_{r1} が増加すると大きくなる(図-6). これは, F_{r1} の増加に伴い breaking region 内の空気混入量が増加し, これが impingement point に向かって流れ込んだためと考えられる. さらに FD の場合, F_{r1} の増加とともに流入射流

の水面の凹凸が大きくなったことも影響していると考えられる.

- ・与えられた F_{r1} に対して, advective diffusion region の形成される $(x-x_1)/h_1$ の範囲は UD と PD_{0.5} の場合に比べ, FD と PD_{0.8} の場合の方が小さい(図-5). これは, 乱流境界層が発達すると advective diffusion region 内の C が大きくなり, 気泡の浮力効果によって短区間で advective diffusion region が上昇したためと考えられる. また乱流境界層の発達状態(UD, PD, FD)を同一にした場合, F_{r1} が増加すると advective diffusion region が形成される $(x-x_1)/h_1$ の値が大きくなる. これは, F_{r1} の増加に伴い流入射流の流速が大きくなり, advective diffusion region 内の空気が遠方まで運ばれたためと考えられる.

5. 参考文献

- 1) Resch, F.J., Leutheusser, H. J., (1972) Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, *La Houille Blanche*, 4, 279-293.
- 2) Chanson, H., Gualtieri, C., (2008), Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps *J. Hydr. Res.*, 46(1), 35-44.
- 3) 高橋正行, 大津岩夫, (2009) 跳水内部の空気混入特性に対する流入射流の影響, *水工学論文集*, 53, 985-990.
- 4) Ohtsu, I., Yasuda, Y., Takahashi, M. (2009) Discussion of Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps, *J. Hydr. Res.*, 47(2), 285-287.
- 5) 持田俊, 安田陽一, 高橋正行, 大津岩夫, (2010)自由跳水の流況形成に対するレイノルズ数の影響, 年次講演会概要集, 65, II 部門, 391-392.
- 6) Ohtsu, I., Yasuda, Y., (1994) Characteristics of supercritical flow below sluice gate *J. Hydr. Engrg.*, 120(3), 332-346.
- 7) Takahashi, M. and Ohtsu, I., (2009) Effect of inflow condition on air entrainment characteristics in hydraulic jump, *Proc. 33rd IAHR Congress*, 4917-4924.
- 8) Chanson, H., (1997) *Air bubble entrainment in free surface turbulent shear flows*, Academic Press, London, U.K..
- 9) Klebanoff, P. S., (1955) Characteristics of turbulence in boundary layer with zero pressure gradient, *NACA Rep.*, 1247.
- 10) Irvine, D. A., Falvey, H. T., (1987) Behavior of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools, *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Part 2, 83, 295-314.
- 11) Wilhelms, S. C., Gulliver, J. S. (2005) Bubbles and waves description of self-aerated spillway flow, *J. Hydr. Res.*, 43(5), 522-531.
- 12) Kucukali, S. and Chanson, H. (2007) Turbulence in hydraulic jumps: Experimental measurements., *Report No. CH62/07*, Dept. Civil Engrg, The Univ. of Queensland, Brisbane, Australia.